

地震常襲都市メキシコシティにおける 地盤および構造物の地震動特性調査

中村 豊¹ ・ 佐藤 勉²

¹正会員 工博 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

²正会員 工修 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

1999 年～2000 年にかけて、メキシコシティにおいて地盤や被災程度が異なる地域の地盤および構造物の常時微動を比較的稠密に計測し、卓越振動数や地震動増幅倍率、被災しやすさ等を調査した。メキシコシティは、1985 年ミチョアカン地震で大きな被害を受けている。調査の結果、地盤の卓越振動数 F_g や地盤の被災しやすさ指標 K_g 値は、丘陵部、遷移部、堆積部の地盤区分や 1985 年を含む過去の地震被害状況と調和的な変化を示すことが確認された。また建物に関しては、1985 年の地震後の調査結果と比較した。

本研究では、発生が恐れられている地震に備えて的確な耐震診断技術を確立することを目指している。

Key Words : Mexico City, Microtremor, H/V Spectral Ratio, QTS, Vulnerability Index

1. はじめに

メキシコ共和国の首都メキシコシティは、世界最大の都市であるとともに数々の地震被害を経験してきた都市でもある。特に、太平洋側で発生した 1985 年ミチョアカン地震では、震源から約 350km も離れているにもかかわらず、市内の軟弱地盤地域を中心に壊滅的な被害が発生した。この被害は、建物自身の耐力はもちろんのこと、表層地盤特性にも起因するものと考えられ、建物の耐震性とともに地盤条件を事前に把握しておくことの重要性を認識させるものであった。

そこで、常時微動を用いて同地域での地盤調査や構造物の振動特性を調査するとともに、今後起こるであろう巨大地震に備え、地盤や構造物の被災しやすさを簡便かつ的確に把握する手法の開発確立を進めている。ここでは、その内容の一端を紹介する。なお、本研究は文部科学省の平成 11 年度および平成 12 年度科学技術振興調整費による「アジア・太平洋地域に適した地震・津波災害軽減技術の開発とその体系化に関する研究」の一環として行っているものである。

2. 調査概要

今回対象とした地域は、図 1 に示すメキシコシティ市街地である。メキシコシティは、16 世紀以降湖を埋め立てて街を拡大させた都市である。市街地のほと

んどが湖を埋め立てて形成された軟弱な堆積地盤地帯に位置している。また地震による被害は、1985 年ミチョアカン地震のみならず、1957 年、1979 年に発生した地震でも同地域の軟弱地盤を中心に発生している。

そこで本調査では、メキシコシティの丘陵地から軟弱地盤への地盤特性変化を詳細に把握するため、図-1 に示すように 3 つの地盤区分(丘陵部、遷移部、堆積部)を網羅する計 5 測線(計 203 測点)で地盤の常時微動測定を行った。また、主に軟弱地盤上に立地する計 24 棟の構造物についても比較的詳細に常時微動を測定した。このうち構造物のいくつかは、1985 年の地震のほか、同地域に比較的大きな被害をもたらした 1995 年の地震(M7.4)を経験している。

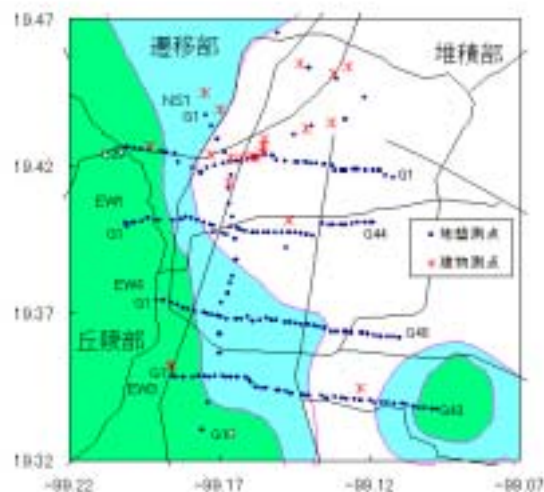


図 - 1 メキシコシティ市街地の測点位置

3. 地盤および構造物の常時微動解析

(1) 地盤の解析

地盤については、各測点で 100Hz サンプリングで約 41 秒間(4096 データ)の測定を 3 回実施した。センサの設置位置は、原則としてアスファルト舗装上としたが、地盤上や石畳上に設置したものもある。水平 2 方向 (NS 方向, EW 方向) と上下方向の計 3 方向成分を同時に測定した。

各測点ごとに水平成分と上下成分のスペクトル比 H/V (QT スペクトル¹⁾) を算出し、表層地盤特性(卓越振動数 F_g , 増幅倍率 A_g) を推定した。さらに、卓越振動数 F_g と増幅倍率 A_g から中村他が提案している地盤の被災しやすさ指標 K_g 値²⁾ を算出し、過去の地震被害や地盤状態との関連について検討を行った。

a) 地盤の被災しやすさ指標 K_g 値²⁾

図-2 に地震時の表層地盤の変形を模式的に示す。地表面の地震時せん断変形を γ_g とすると、表層地盤のひずみ γ_g は近似的に次式のように表される。

$$\begin{aligned} \gamma_g &= \frac{\gamma_g}{h} \\ &= e \cdot a / (2 F_g)^2 \times 4 F_g / V_s \\ &= e \cdot A_g \cdot a / (e^2 \cdot F_g \cdot V_b) \times V_b / V_s \\ &= \frac{A_g^2}{F_g} \cdot \frac{e \cdot a}{e^2 \cdot V_b} = K_g \cdot C \cdot a \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} \quad K_g &= A_g^2 / F_g \\ C &= e / (e^2 \cdot V_b) \end{aligned} \quad (2)$$

- γ_g : せん断ひずみ ($\times 10^{-6}$)
- A_g : 表層地盤の増幅倍率(倍) ($= V_b / V_s$)
- F_g : 地盤の卓越振動数(Hz) ($= V_s / 4h$)
- a : 基盤加速度(Gal)
- e : 地震動加速度の有効率
- V_b : 基盤の S 波伝播速度(m/sec)

ここで、 $V_b = 600\text{m/s}$, $e = 0.6$ と仮定すれば、 $C = 1.0$ となり、有効歪みは地震時の最大加速度に K_g 値を乗じて概算できることになる。 K_g 値は地盤固有の指標値であり、地盤の被災しやすさを表すと考えることができる。 K_g 値は(2)式のように、各測点で推定された卓越振動数 F_g と増幅倍率 A_g から容易に求められる。

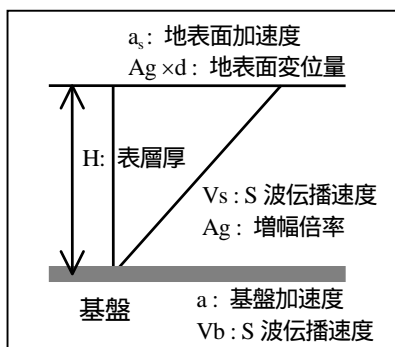


図 - 2 表層地盤と基盤の振動に関する模式図

(2) 構造物の解析

構造物については、原則として屋上と構造物の基礎部(例えば、1 階または地階)の 2 点で同時に常時微動を測定した。各測点で、100Hz(または 50Hz)サンプリングで約 41 秒間(または約 82 秒間)の 4096 データの測定を 3 回繰り返して実施した。そして、屋上と基礎部で対応する方向のスペクトル比を算出し、その構造物の伝達スペクトル (HL 方向, HT 方向) を求めた。これから、各方向の卓越振動数 F_b , 増幅倍率 A_b を推定した。さらに、推定された構造物の振動特性から、建物の被災しやすさを示す指標である平均 K_b 値³⁾ の $_{av}K_b$ 値を算出した。

a) 建物の被災しやすさ指標 K_b 値³⁾

建物の i 階の層変形角 γ_i と構造物の応答加速度の関係は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \gamma_i / h_i = e \cdot a \cdot (A_{i+1} - A_i) / (2 F_b)^2 / h_i \\ &= e \cdot K_{bi} \cdot a \end{aligned}$$

$$K_{bi} = 10^4 \cdot (A_{i+1} - A_i) / (2 F_b)^2 / h_i$$

ここで建物応答に関する効率 e は、地震動の継続時間や建物基礎寸法と入力波長との関係などで決定される。 K_{bi} は建物各層固有の指標値であり、建物各層の被災しやすさをあらわすと考えられる。ここでは建物各層の K_{bi} 値を平均した $_{av}K_b$ 値について検討する。

建物の平均的な層変形角 $_{av}\gamma_s$ は、次のようになる。

$$\begin{aligned} _{av}\gamma_s &= \sum s_i / n \\ &= e \cdot a_s \cdot (A_n - A_0) / (2 F_s)^2 / h_i / n \\ &= e \cdot A_n \cdot a_s / (2 F_s)^2 / h \\ &= \frac{e \cdot 10^4 \cdot A_b}{4 \cdot F_b^2 \cdot h} \cdot a_s = e \cdot _{av}K_b \cdot a_s \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{ここに、} \quad _{av}K_b = 10^4 \cdot A_b / (4 \cdot F_b^2 \cdot h) \quad (4)$$

- $_{av}\gamma_s$: 建物の層変形角 ($\times 10^{-6}$)
- A_b : 建物の増幅倍率(倍) ($= A_n$)
- F_b : 建物の卓越振動数(Hz)
- h : 建物の高さ(m)
- a : 地表面加速度(Gal)

4. 地盤および構造物の常時微動解析結果

(1) 地盤の解析結果

常時微動測定によって求められた地盤の各測点の卓越振動数 F_g , 表層地盤の増幅倍率 A_g および地盤の被災しやすさ指標 K_g 値を、過去の地震被害との関連で考察する。

a) 卓越振動数 F_g の分布

図-3 は、メキシコシティ市街地軟弱地盤層の等深線上に、各測点の QT スペクトルから推定された卓越振動数 F_g を示したものである。 F_g の大きさは全体の

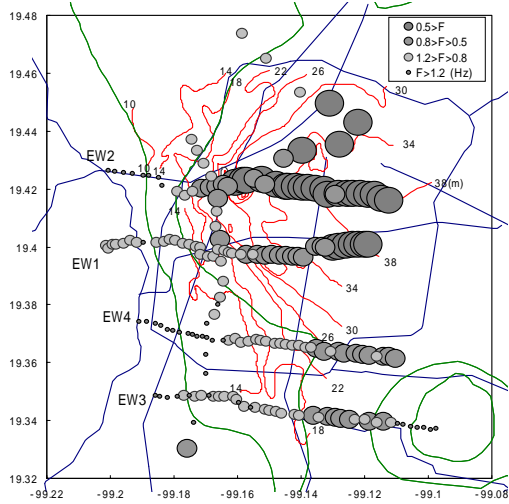


図 - 3 堆積地盤の等深線上における卓越振動数 F_g の分布

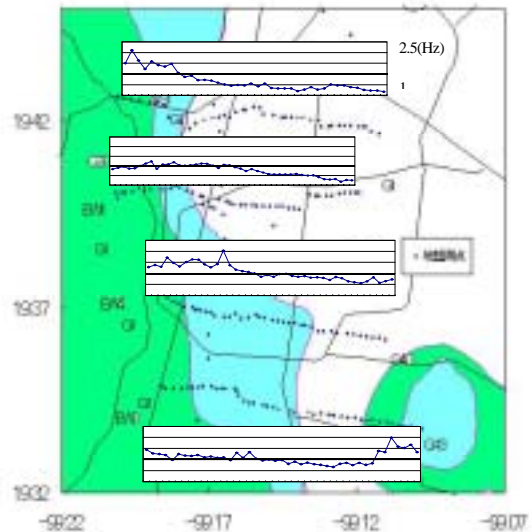


図 - 4 地盤区分上の卓越振動数 F_g の分布

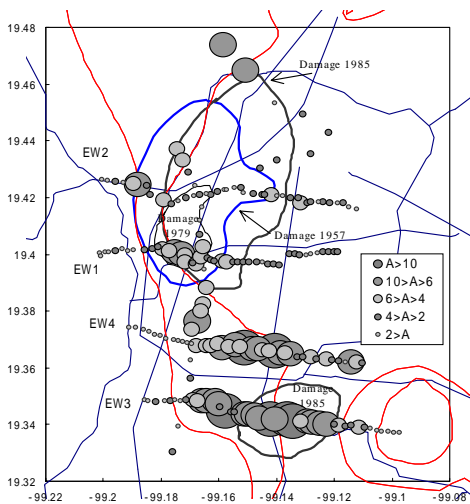


図 - 5 増幅倍率 A_g の分布

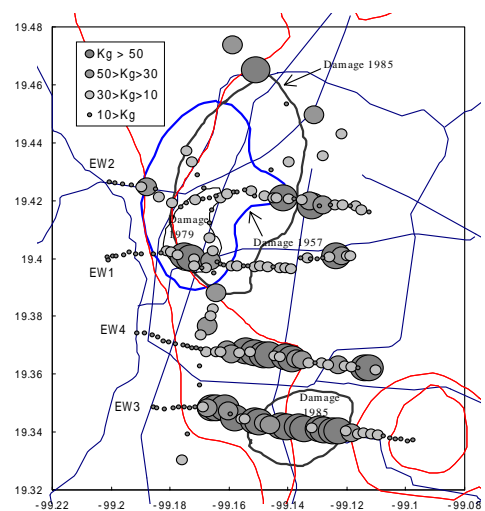


図 - 6 地盤の被災しやすさ指標 K_g 値の分布

傾向を把握しやすくするため、いくつかの F_g の大きさを 4 段階に分けた。調査地域は、西側に丘陵地、東側に湖を埋め立てた堆積地があり、西から東に移るにつれ軟弱層が徐々に堆積していく地盤構造になっている。図中の F_g の分布は、その地盤構造に対応して、西から東へと F_g が徐々に小さくなる傾向が明瞭に認められる。また、軟弱層がより厚く堆積している地域では、薄く堆積している地域に比べより小さな F_g が分布している。同地域の地盤の卓越振動数は、軟弱地盤である堆積層の特性を反映したものと考えられる。図-4 は、より詳細な各測点の卓越振動数分布を示したものである。図中には、3 つに区分された地盤(丘陵部、遷移部、堆積部)の各 EW 測線上の F_g の変化を示したものである。グラフ中の太い線が 1(Hz)を示す。1(Hz)となる地点は、概ね堆積部と遷移部の境界に相当することがわかる。

b) 増幅倍率 A_g と地盤の被災しやすさ指標 K_g 値の分布

図-5 は、QT スペクトルから求められた各測点ごとの増幅倍率 A_g の分布である。また、図中には増幅倍率 A_g の分布のほか、過去の地震(1957, 1979, 1985 年)で発生した建物被害地域も合わせて図示した。EW3,EW4 測線の A_g の分布は、丘陵部以外のほとんどのところで大きな値を示す。また、EW3 測線の被害経験域は大きな A_g に対応している。

次に、各測点で定義された卓越振動数 F_g と増幅倍率 A_g から、地盤の被災しやすさを表わす指標 K_g 値を求めた。 K_g 値が大きいということは、地震で被災しやすい地盤であることを意味する。図-6 に K_g 値の分布を示す。この分布も F_g 同様に 4 段階に分けて示した。 K_g 値は丘陵地以外で大きな値を示す傾向が認められる。特に、EW1, EW3 の測線では、 K_g 値が大きいところと建物被害地域がよく対応している。

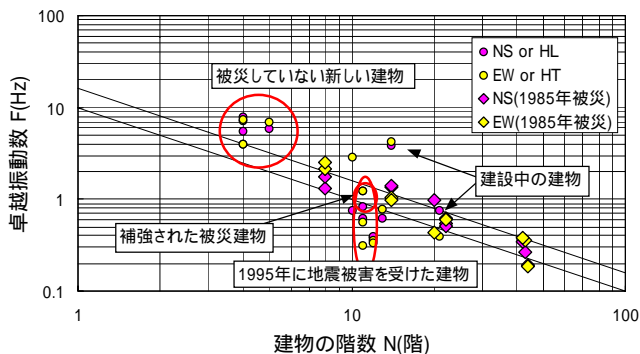


図 - 7 測定した建物の卓越振動数 F_b と階数 N の関係

表 - 1 1985 年の地震直後に調査⁴⁾された建物と 2000 年に本研究で調査した建物

	階数	1985 年		2000 年	
		NS(Hz)	EW(Hz)	NS(Hz)	EW(Hz)
Latino Americana	44	0.22	0.21	0.20	0.19
PEMEX	48	0.28	0.36	0.27	0.36
Hotel Chapultepec	42	0.40	0.40	0.35	0.38

(2) 構造物の解析結果

図-7 は、調査を行った計 24 棟の卓越振動数 F_b とその階数 N の関係を求めたものである。これには、従来言われている関係式 ($1/F_b = 0.06N \sim 0.1N$) を図示した。調査結果は関係式の上方に逸脱するものもあるが、下方に逸脱するものも多い。下方に逸脱するものの多くは地震被害を受けたものである。図-7 において、新築中の 2 棟以外の 8 階以上の中高層ビルは、過去の地震で被災した経験がある。なお、被災した中高層ビルは、その卓越振動数から、地震時に軟弱な堆積地盤と共振したことが推測される。また、低層構造物は地震後建てられたもので被災経験はない。低層構造物の卓越振動数は、標準的な F_b - N 関係から推定される値より高くなっているが、1995 年に被災したままの中高層建物の卓越振動数は標準値よりも低い値となっている。被災したものの補強された構造物 1 棟や新築中の 21F 建ての構造物、その他超高層の構造物は標準的な F_b - N 関係に概ね適合している。以上のことから、図-7 の F_b - N 関係線により、建物のおおまかな耐震性を判断できるものと考えられる。

表-1 は、1985 年ミチョアカン地震や 1995 年の地震 (M7.4) を経験した超高層ビル 3 棟について、1985 年の地震直後に行われた微動測定結果と今日の測定結果を比較したものである。 F_b はほとんど変化していないことがわかる。

次に、卓越振動数 F_b の NS または EW 成分のどちらか

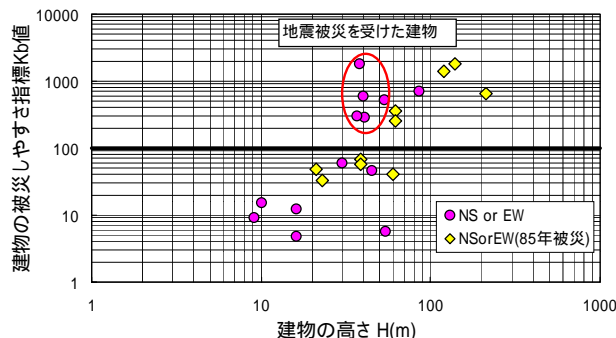


図 - 8 建物の被災しやすさ指標 avK_b 値と建物の高さの関係

低い方の値から被災しやすさ指標 avK_b 値を算出し、構造物の高さ H との関係性を求めた(図-8)。その結果、図-7 で基準値よりも小さな F_b を示した構造物はもちろんのこと、1985 年に被災したいくつかの構造物も大きな avK_b 値となっている。なお、楕円で囲まれた建物は、全て 1985 年または 1995 年の地震を経験しており、地震被害を受けている。超高層 3 棟が大きな avK_b 値を示していることについては、今後検討していきたい。

5. まとめ

本研究では、たびたび大きな地震に見舞われ多数の被害が発生しているメキシコシティを対象に、地盤および低層から超高層までの構造物の常時微動測定を行い、振動特性を推定した。

その結果、市街地のほとんどが位置する軟弱な堆積地盤上では、表層地盤の卓越振動数 F_g が 1(Hz)以下となり、その地域一帯に立地する中層の構造物の卓越振動数 F_b とほぼ一致していることが確認できた。また、地盤の被災しやすさ K_g 値は一般に被害常襲地域で大きくなり、建物の被災しやすさ avK_b 値は過去の地震で被災した建物で大きな値を示した。

今後も資料を蓄積し、簡便で的確な評価指標の確立を目指したい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、現地での測定に便宜を図って頂いているメキシコ CIRES の Espinosa Aranda 所長を始めとする関係の方々には謝意を表します。また、測定に協力して頂いた(株)SDR の新谷恒章氏、E. Di Iek Gurler 女史、EDM 出向中の斎田淳氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告、1988 年
- 2) 中村、滝沢：常時微動を用いた地盤の液状化予測、土木学会第 45 回年次学術講演会、1990 年
- 3) Nakamura, Y. : Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor, World Congress on Railway Research in Florence, Italy, November, 1997
- 4) 日本建築学会:1985 年メキシコ地震災害調査報告,1987 年